Interféromètre de type Mach-Zehnder en silicium poreux : application aux biocapteurs

Mohamed Hiraoui, Mohammed Guendouz, Nathalie Lorrain, Lazhar Haji

INTERFEROMETRE DE TYPE MACH-ZEHNDER EN SILICIUM POREUX : APPLICATION AUX BIOCAPTEURS

M. Hiraoui, M. Guendouz, N. Lorrain et L. Haji

Université européenne de Bretagne (UeB), CNRS-Foton UMR 6082, Enssat, 6 rue de Kérampont, CS 80518, F-22305 Lannion, France

mohammed.guendouz@univ-rennes1.fr

RÉSUMÉ

Dans cette étude est présentée la réalisation et la caractérisation d'un guide d'ondes optique enterré et anti-résonant à base de silicium poreux. Ce guide d'ondes est intégré dans une structure interférométrique de type Mach-Zehnder qui sera utilisée pour une application de biodétection. Les simulations et les caractérisations optiques montrent clairement le guidage monomode ainsi que le caractère anti-résonant des guides d'ondes enterrés.

MOTS-CLEFS : *Silicium poreux ; Guide anti-résonant ; Structure Mach Zehnder.*

1. INTRODUCTION

L'interféromètre de type Mach-Zehnder (MZ) est un interféromètre à division d'amplitude permettant une application de détection d'espèces chimiques et biochimiques [1-2]. Différentes structures guidantes résonantes ou anti-résonantes constituant le MZ ont été développées en utilisant divers matériaux [3-4]. Dans notre cas, nous nous sommes intéressés à la fabrication d'une structure guidante anti-résonante (ARROW) à base de silicium poreux. Cette structure est constituée de trois couches d'épaisseurs et de porosités différentes (et donc d'indices différents) respectant les conditions d'anti-résonance. La particularité d'un tel guide ARROW réside dans le fait que la couche poreuse en surface assure le guidage de la lumière tout en permettant l'infiltration de molécules et donc leur détection [5]. Les deux couches placées juste en dessous de la couche de guidage doivent présenter les caractéristiques d'un résonateur Fabry-Pérot afin d'assurer le confinement optique. Le guide ARROW favorise alors un meilleur recouvrement entre la lumière propagée et les molécules fixées à la surface interne de la couche poreuse active. Les résultats des caractérisations structurales des guides enterrés à base de silicium poreux constituant le MZ et obtenus par la technique de photolithographie sont reportés dans la communication. Puis nous présentons une étude théorique de la réflectivité au niveau de l'interface couche de guidage/1ère couche de confinement pour prévoir l'obtention du caractère anti-résonant qui dépend des valeurs d'indice des couches poreuses ainsi que de leur épaisseur. Enfin, les résultats de caractérisations optiques en champ proche de l'interféromètre MZ sont présentés et comparés à ceux issus d'une étude de simulation par BPM.

2. DESCRIPTION DE LA STRUCTURE MACH ZEHNDER EN SILICIUM POREUX

La structure MZ, schématisée sur la figure 1a, a été élaborée à partir de substrats de silicium de type P fortement dopé, en utilisant un procédé de photolithographie avec un masque dont les dimensions des ouvertures sont bien définies. Le processus d'anodisation électrochimique est ensuite effectué à travers les ouvertures réalisées pour l'élaboration des trois couches de porosités et d'épaisseurs différentes satisfaisant les conditions d'antirésonance.. Les caractérisations structurales par microscopie électronique à balayage (MEB) ont montré en vue de dessus (figure 1b) une gravure de très bonne qualité, homogène et continue qui illustre la bonne qualité de fabrication de la structure à base de silicium poreux. Dans les figures 1c et 1d, les images de section transversale (coupe A) montrent un guide d'ondes dont la forme est similaire à un demi-cylindre, due à l'anisotropie du processus de formation liée à l'orientation cristallographique du substrat de silicium [6]. Nous distinguons les trois couches poreuses d'indices et d'épaisseurs différents qui sont reportés sur la figure 1d. Les valeurs d'indice de chacune des couches ont été déterminées par

réflectométrie grâce à une étude préliminaire effectuée sur des simples couches réalisées dans les conditions identiques à celles utilisées pour le guide anti-résonant. Les dimensions géométriques des couches et les indices de réfraction des différentes couches de la structure guidante visés ont été choisis pour obtenir un compromis entre une sensibilité assez importante et une fabrication aisée.

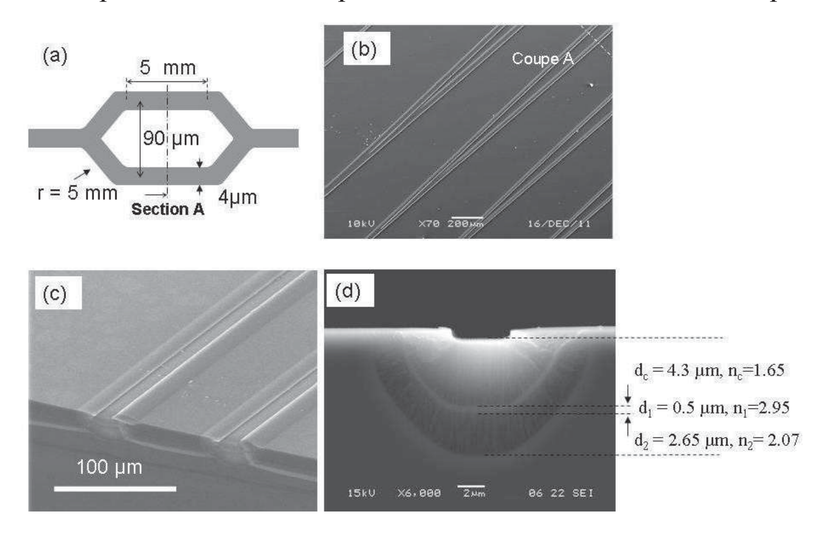


Figure 1 : Caractéristiques de l'interféromètre de Mach-Zehnder (a). Micrographies obtenues au MEB : vue de dessus de jonctions Y constituant la structure MZ (b,c) et coupe transverse d'un guide d'onde canal de la structure MZ (d).

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX (SIMULATION ET EXPERIENCE)

Afin de qualifier la réflectance à l'interface couche de cœur et première couche de confinement, nous l'avons calculée en fonction de l'épaisseur de la première couche de confinement d_1 (figure 2) pour les deux modes de polarisation en utilisant les valeurs expérimentales des épaisseurs et des indices des couches : $d_c = 4,3$ µm, $n_c = 1,65$, $n_1 = 2,95$, $n_2 = 2,07$ et à $\lambda = 1,55$ µm.

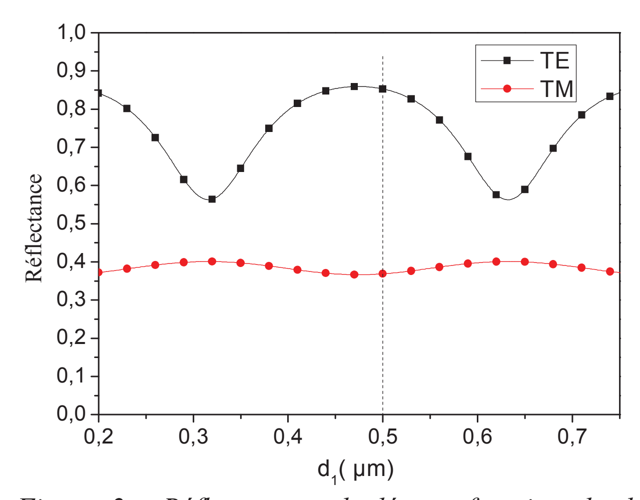
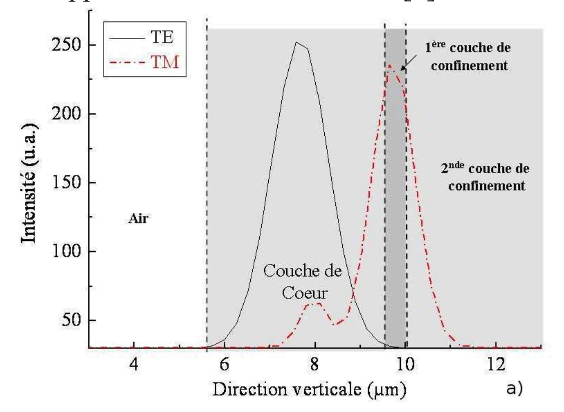


Figure 2 : Réflectance calculée en fonction de d_1 pour les modes TE et TM

Nous notons pour le mode TE, que le maximum de réflectance est obtenu pour une épaisseur d_1 d'environ 0,5 µm correspondant à l'épaisseur expérimentale. Alors que dans le cas du mode TM, nous remarquons que la réflectance est faible et que la différence entre le maximum et le minimum de réflectance est plus petite comparée à celle calculée en mode TE. Cette distinction entre les deux modes de polarisation reflète bien le caractère anti-résonant de la structure [7]. Afin d'évaluer qualitativement le guidage dans les guides anti-résonants constituant la structure MZ, nous avons effectué des mesures en champ proche pour contrôler le changement de la lumière propagée à la sortie du MZ pour les deux modes de polarisation.

Parallèlement, nous avons effectué une étude de simulation du profil du champ propagé à la sortie de chaque guide en utilisant la méthode des faisceaux propagés (BPM) et en tenant compte des valeurs expérimentales des indices de réfraction et des épaisseurs des différentes couches (figures 3a et 3b). Dans le cas du mode TE, les profils expérimentaux et simulés montrent que la lumière est guidée quasiment uniquement dans la couche de cœur malgré son faible indice de réfraction et de façon monomodale. Tandis que pour le mode TM, la lumière se propage principalement dans la première couche de confinement ayant l'indice de réfraction le plus élevé alors qu'une faible partie est guidée dans la couche de cœur. Ces résultats confirment le caractère anti-résonant du guide

enterré et concordent avec l'étude théorique de la réflectance présentée dans la figure 2 qui indique qu'en mode TM le coefficient de réflexion est faible comparé à celui calculé en mode TE. Cette différence est aussi liée au fait que le contraste d'indice de réfraction entre la couche de cœur et la première couche de confinement est relativement élevé. Nous avons également montré expérimentalement que nous obtenons quasiment les mêmes profils de champ dans les deux bras après clivage du MZ en son milieu [8]. Ceci est en faveur de l'obtention d'un bon contraste des franges d'interférence entre le bras de référence et le bras de détection, ce qui est un avantage pour des applications de bio-détection [9].



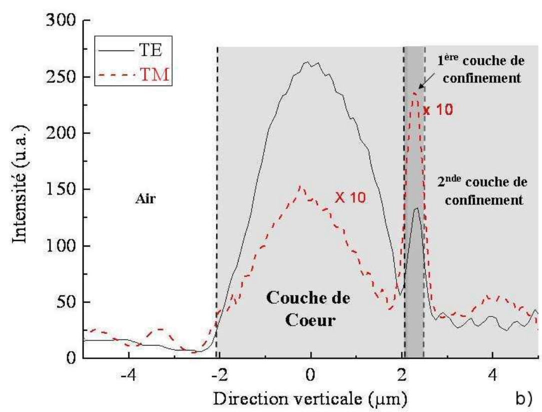


Figure 3 : Profils d'intensité en champ proche, en sortie du MZ de largeur égale à 4 µm et suivant l'axe vertical en mode TE et TM, obtenus expérimentalement (a) et par simulation (b).

CONCLUSION

Des guides d'onde optiques monomodes de type ARROW à base de silicium poreux ont été conçus pour le développement d'un capteur basé sur un interféromètre MZ. L'étude théorique de la réflectance et la simulation du champ ont permis de prévoir comment celui-ci se propage au sein de la structure MZ tenant compte des indices de réfraction et des épaisseurs pour les conditions d'antirésonance. Les résultats expérimentaux de la valeur du champ optique détecté à la sortie ainsi qu'au milieu de la structure sont en bon accord avec la simulation menée par BPM. Le travail porte maintenant sur l'application de détection de biomolécules nécessitant des étapes supplémentaires de fonctionnalisation du Si poreux, la réalisation d'une ouverture d'interaction dans un des bras du MZ ainsi que l'adaptation d'un système micro-fluidique permettant l'infiltration des biomolécules. Un tel dispositif permettra la détection d'une variation d'indice dans la zone d'interaction avec une limite de l'ordre de 10^{-4}-10^{-5}.

Soutiens : *Ce travail a bénéficié du projet PONANT du CPER avec la région Bretagne, le conseil général des Côtes d'Armor, de Lannion Trégor Agglomération et du Feder.*

RÉFÉRENCES

[1] R. G. Heideman, P.V. Lambeck. Sens. and Actuators B.61 (1999) 100.
[2] F. Prieto, B. Sepulveda, A. Calle, A. Llobera, C. Dominguez, and L.M. Lechuga. Sens. Actuators B.92 (2003) 151.
[3] E.F. Schipper, A.M. Brugman, C. Dominguez, L.M. Lechuga, R.P.H. Kooyman, J. Greve. Sens. and Actuators B.40 (1997) 147.
[4] D. Jimenez, E. Bartolome, M. Moreno, J. Munoz, C. Dominguez. Opt. Commun..132 (1996) 437.
[5] M. Hiraoui, L. Haji, M. Guendouz, N. Lorrain, A. Moadhen and M. Oueslati. Biosens. and Bioelectron., 36, 212-216, 2012.
[6] M. Guendouz, P. Joubert, M. Sarret. Mat. Sci. and Eng. B.70 (2000) 43.
[7] M.A. Duguay, Y. Kokubun and T. L. Koch. Appl Phys Lett. 49 (1986) 13.
[8] M. Hiraoui, M. Guendouz, N. Lorrain, L. Haji, and M. Oueslati. Appl. Phys. Lett., 101, 191114, 2012.
[9] J. Hong, J .S Choi, G. Han, J.K. Kang, C. M. Kim, T. S. Kim, D. S. Yoon. Anal. Chim Act. 573 (2006) 97.